

JAKOŚĆ POWIETRZA, KTÓRYM ODDYCHAMY - SPOJRZENIE Z KOSMOSU

DR HAB. ALFRED STACH, PROF. UAM

Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych
Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu

WPROWADZENIE

Zanieczyszczenia powietrza Międzynarodowa Organizacja Pracy definiuje jako wszelkie skażenie powietrza przez substancje, które są szkodliwe dla zdrowia lub niebezpieczne z innych przyczyn, bez względu na ich postać fizyczną. Powietrze zanieczyszczają wszystkie substancje gazowe, stałe lub ciekłe, znajdujące się w nim w ilościach większych niż ich średnia zawartość. W tabeli 1 zawarty jest spis głównych substancji stanowiących zanieczyszczenia atmosfery. Światowa Organizacja Zdrowia określa powietrze zanieczyszczone jako takie, którego skład chemiczny może ujemnie wpłynąć na zdrowie człowieka, roślin i zwierząt, a także na inne elementy środowiska (wodę, glebę). Głównymi źródłami zanieczyszczeń są:

- wzrost liczby ludności,
- produkcja przemysłowa,
- energetyka,
- transport,
- źródła naturalne (erupcje wulkaniczne, wietrzenie i erozja skał/gleb, pożary roślinności itp.)

Zła jakość powietrza to problem mający wielorakie uwarunkowania i olbrzymie konsekwencje społeczne, gospodarcze i ekologiczne (ryc. 1).

Tabela 1.

Główne substancje stanowiące zanieczyszczenia atmosfery (UN Environment (2019). Global Environment Outlook - GEO-6: Healthy Planet, Healthy People. Nairobi. DOI: 10.1017/9781108627146).

Substancja: nazwa międzynarodowa	Skrót	Substancja: nazwa polska
black carbon	BC	sadza
chlorofluorocarbons	CFCs	chlorofluorowęglowodory
methane	CH ₄	metan
carbon monoxide	CO	tlenek węgla
carbon dioxide	CO ₂	dwutlenek (ditlenek) węgla
greenhouse gases	GHGs	gazy cieplarniane
hydrochlorofluorocarbons	HCFCs	wodorochlorofluorowęglowodory
hydrofluorocarbons	HFCs	wodorofluorowęglowodory
mercury	Hg	rtęć
nitrous oxide	N ₂ O	podtlenek azotu
ammonia	NH ₃	amoniak
non-methane volatile organic compounds	NMVOC	niemetanowe lotne związki organiczne
nitrogen oxide	NO	tlenek azotu
nitrogen dioxide	NO ₂	dwutlenek (ditlenek) azotu
nitrogen oxides	NO _x	tlenki azotu
ozone, tropospheric and stratospheric	O ₃	ozon, troposferyczny i stratosferyczny
organic carbon	OC	węgiel organiczny
ozone-depleting substances	ODS	substancje zubożające warstwę ozonową
polycyclic aromatic hydrocarbons	PAHs	wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne
lead	Pb	ołów
polybrominated diphenyl ethers	PBDE	polibromowane etery difenyłowe
persistent, bioaccumulative, toxic chemicals (includes POPs, metals)	PBTs	trwale, wykazujące zdolność do bioakumulacji, toksyczne chemikalia (w tym POPs, metale)

Substancja: nazwa międzynarodowa	Skrót	Substancja: nazwa polska
polychlorinated biphenyl	PCB	polichlorowany bifenyl
per- and polyfluoroalkyl substances	PFAS	substancje per- i polifluoroalkilowe
particulate matter	PM	pył zawieszony
PM less than 10 µm in diameter	PM ₁₀	PM o średnicy poniżej 10 µm
PM less than 2.5 µm in diameter	PM _{2,5}	PM o średnicy poniżej 2,5 µm
persistent organic pollutants (as defined by international agreements)	POPs	trwale zanieczyszczenia organiczne (określone w umowach międzynarodowych)
sulphur dioxide	SO ₂	dwutlenek (dITLENEK) siarki

Konsekwencje te dotyczą szerokiego zakresu skal przestrzeni i czasu (ryc. 2). Jako najważniejszy zazwyczaj przyjmuje się wpływ na zdrowie i długość życia ludzi. Tylko 5% populacji świata oddycha czystym powietrzem, a 91% żyje w warunkach poniżej norm WHO¹. Szeroko znany i dobrze udokumentowany jest wpływ zanieczyszczeń powietrza na układ oddechowy i krążenie krwi². Zanieczyszczenie powietrza jest czwartym najważniejszym czynnikiem ryzyka przedwczesnej śmierci na całym świecie odpowiedzialnym co roku za śmierć 6,67 mln osób. Wyniki najnowszych badań wskazują na znaczącą rolę zanieczyszczeń powietrza w rozwoju chorób neurodegeneracyjnych³ i jej wpływ na poziom i rodzaj przestępczości⁴. Zidentyfikowano także silny związek pomiędzy złą jakością powietrza a liczbą zachorowań i zgonów na COVID-19. Związek ten jest widoczny zarówno na poziomie globalnym, jak i kontynentalnym i regionalnym⁵.

¹ Patrz pod adresem: <https://epha.org/how-much-is-air-pollution-costing-our-health/>. (dostęp: 14.05.2021)

² Patrz pod adresem: <https://www.stateofglobalair.org/health>. (dostęp: 14.05.2021)

³ Carey, I.M., Anderson, H.R., Atkinson, R.W., i in., (2018). **Are noise and air pollution related to the incidence of dementia? A cohort study in London, England.** *BMJ Open*, 8: e022404. doi:10.1136/bmjopen-2018-022404.

⁴ Bondy, M., Roth, S., Sager, L., (2020). **Crime Is in the Air: The Contemporaneous Relationship between Air Pollution and Crime.** *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists* 7(3). doi: <https://doi.org/10.1086/707127>.

⁵ Jarynowski, A., Wójta-Kempa, M., Krzowski, Ł., (2020). **An attempt to optimize human resources allocation based on spatial diversity of COVID-19 cases in Poland.** *medRxiv*, doi: 10.1101/2020.10.14.20090985.

Wyraźnie niedoceniany jest jednakże gospodarczy aspekt zanieczyszczeń powietrza, związany przede wszystkim z obniżką plonów. Wysokie stężenia ozonu przy powierzchni terenu mogą wywoływać spadki plonów niektórych roślin uprawnych, przekraczające 40%⁶. Wartość pieniężną strat dobrobytu na świecie w wyniku zanieczyszczeń powietrza oszacowano na 5,1 bln US\$ (lub 6,6% światowego produktu brutto)⁷. Warszawa w wyniku zanieczyszczeń powietrza traci co roku 30 mld zł⁸.

Wymagającym osobnego omówienia, i wykraczającym poza zakres niniejszego opracowania, jest wpływ zanieczyszczenia powietrza na ekosystemy, a zwłaszcza na globalne ocieplenie (ryc. 1).

METODY OCENY STANU I PROGNOZOWANIA JAKOŚCI POWIETRZA

Precyzyjna ocena aktualnego stanu jakości powietrza i jego prognozowanie jest problemem bardzo trudnym do rozwiązania. Wynika to z wielu czynników. Najważniejszym z nich jest skomplikowana, ze względu na genę zachodzących w niej procesów, dynamika atmosfery, jak i szeroki zakres skal przestrzeni i czasu, które należy uwzględnić. Są to na jednym końcu zakresu, który musi być brany pod uwagę, mikroskalowa turbulencja zachodząca od skali sekund i decymetrów, a fale cyklonalne i planetarne rozwijające się w ciągu kilku, kilkunastu dni na dystansie

Pozzer, A., i in. (2020). **Regional and global contributions of air pollution to risk of death from COVID-19.** *Cardiovascular Research*, 116 (14), 2247–2253, doi: 10.1093/cvr/cvaa288

Wu, X., i in., (2020). **Air pollution and COVID-19 mortality in the United States: strengths and limitations of an ecological regression analysis.** *Science Advances*, 6 (45), eabd4049, doi: 10.1126/sciadv.abd4049.

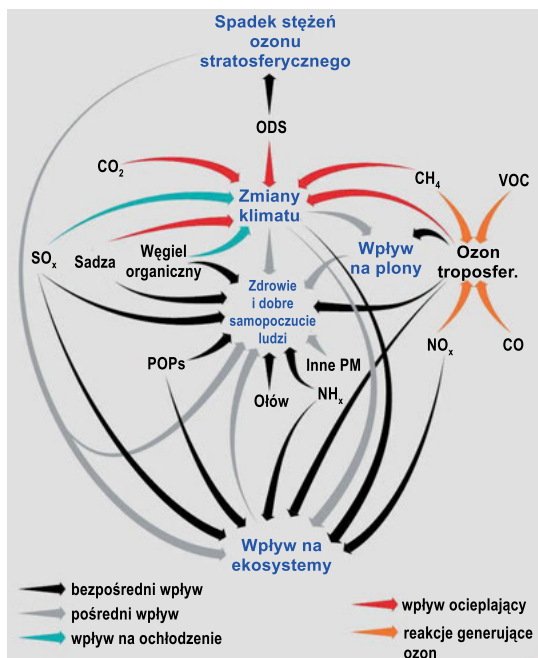
⁶ Patrz pod adresem: <https://www.ars.usda.gov/southeast-area/raleigh-nc/plant-science-research/docs/climate-changeair-quality-laboratory/ozone-effects-on-plants/>.

⁷ Nam, K.-M., N.E. Selin, J.M. Reilly, and S. Paltsev. (2010). **Measuring Loss in Human Welfare Caused by Air Pollution: A CGE Analysis for the European Region.** *Energy Policy* 38(9), 5059–5071, doi: 10.1016/j.enpol.2010.04.034.

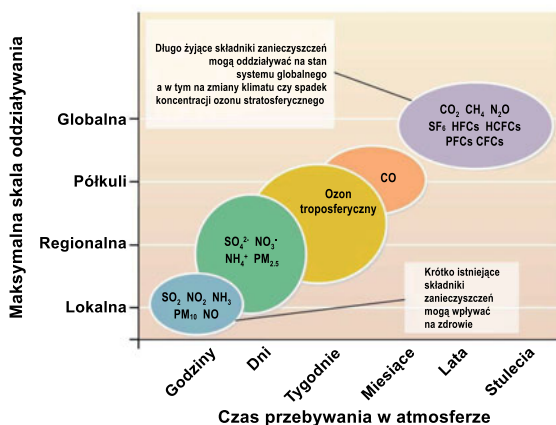
Patrz pod adresem: <https://www.theigc.org/reader/suffocating-prosperity-air-pollution-and-economic-growth-in-developing-countries/air-pollution-has-severe-economic-and-welfare-costs-these-costs-are-often-excluded-when-designing-new-policies/>. (dostęp: 14.05.2021).

Patrz pod adresem: <https://epha.org/how-much-is-air-pollution-costing-our-health/>.

⁸ Patrz pod adresem: <https://www.tokfm.pl/Tokfm/7,130517,24227907,kamil-wyszkowski-dyrektor-inicjatywy-sekretarza-generalnego.html>. (dostęp: 14.05.2021).



Ryc. 1. Oddziaływania i powiązania wybranych substancji emitowanych do atmosfery (UN Environment (2012). Global Environment Outlook - GEO-5: Environment for the future we want. Nairobi. doi: 10.13140/RG.2.1.1713.6162)



Ryc. 2. Wybrane zanieczyszczenia, średnie czasy ich przebywania w atmosferze i maksymalny zasięg oddziaływania (UN Environment (2007). Global Environment Outlook - GEO-4: Environment for Development. Nairobi. <https://www.unep.org/resources/global-environment-outlook-4>).

tysięcy kilometrów, na drugim jego końcu. Obraz dodatkowo komplikuje wpływ topografii oraz pokrycia i użytkowania terenu.

Kolejnym elementem systemu jest rozmieszczenie przestrzenne, charakter i zmienność czasowa źródeł emisji poszczególnych składników zanieczyszczeń. Jedne z nich mają charakter punktowy i względnie stałe natężenie „produkcji”, inne są raczej obszarowe, a emisja z nich zmienia się w szerokim zakresie zarówno cyklicznie (na przykład w trakcie doby czy roku), jak i niesystematycznie. Należy również pamiętać, że część składników „koktajlu” zanieczyszczeń powietrza ulega z czasem przemianom chemicznym, a tempo tych zmian zależy od skomplikowanej kombinacji składu i własności fizycznych atmosfery oraz natężenia i spektrum światła słonecznego (procesy fotochemiczne). Dlatego też często wyróżnia się „pierwotne” i „wtórne” zanieczyszczenia, tworzące się w atmosferze po pewnym czasie od emisji z tych pierwszych.

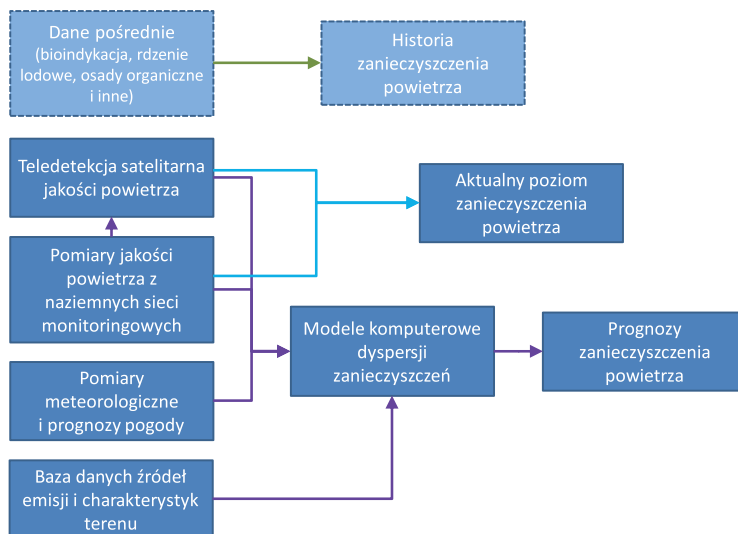
Kolejnym problemem do rozwiązania są względnie bardzo niskie stężenia, w których występują poszczególne składniki zanieczyszczeń powietrza. Odniesione do jednostkowej objętości są to proporcje rzędu 1 na milion (ppm, czyli obecność 1 cząsteczki związku chemicznego w 10^6 cząstek powietrza) lub 1 na miliard (ppb, czyli obecność 1 cząsteczki związku chemicznego w 10^9 cząstek powietrza). Alternatywnymi jednostkami, w których określa się stężenia składników zanieczyszczeń, szczególnie pyłowych, są mikrogramy na metr sześcienny powietrza (μm^{-3} , czyli milionowa część grama na m^3).

Stosowane metody pomiarowe muszą być zatem dostatecznie czułe, aby wykryć tak niskie stężenia, ale jednocześnie umożliwiać pomiary w bardzo szerokim zakresie zmienności, bo owe stężenia często rosną o kilka rzędów wielkości w bardzo krótkim czasie. Pełna ocena wpływu zanieczyszczeń powietrza zarówno na zdrowie ludzi, jak i na ekosystemy, wymaga ich ciągłego monitoringu. Negatywny skutek może wywołać bowiem zarówno krótkotrwałe, bardzo wysokie stężenie powodujące natychmiastowe „zatrucie” organizmu, jak i długotrwała ekspozycja na stosunkowo niski jego poziom. W tym drugim przypadku, kiedy tempo absorpcji substancji toksycznej z powietrza jest większe niż tempo jej rozkładu w organizmie i/ lub jej wydalania na zewnątrz, może nastąpić kumulacja toksyny, aż do przekroczenia fizjologicznej granicy tolerancji. Dlatego też normy jakości powietrza dla poszczególnych składników podawane są w odniesieniu do określonego czasu ich uśredniania (1 godzina, 8 godzin, 1 doba, 1 rok) i częstości ich przekraczania w dłuższych okresach (na przykład liczba przekroczeń normy 1-godzinnej w trakcie doby).

Wszystko to powoduje, że bezpośrednie, precyzyjne pomiary elementów jakości powietrza wymagają kosztownego sprzętu i wysokich

kwalifikacji obsługującego je personelu. Z tego względu sieć punktowych pomiarów, o wysokich standardach ich dokładności, jest względnie rzadka, nawet w krajach zamożnych o dużej gęstości zaludnienia. W Ameryce Północnej, na przykład, na milion mieszkańców przypada około 10 naziemnych stacji monitoringu jakości powietrza, podczas gdy w Azji i Afryce ten wskaźnik wynosi średnio 0,4⁹. Większość takich stacji jest skupionych na obszarach miejskich, podczas gdy niektóre tereny pozamiejskie są położone setki kilometrów od najbliższego czujnika. Praktycznie bez „pokrycia” są też ogromne połacie oceanu.

Interesuje nas również zazwyczaj nie tylko stan aktualny jakości powietrza w danym punkcie, czy też na danym obszarze, ale także historia zanieczyszczenia dla tych lokalizacji, a przede wszystkim prognoza jego zmian o zakresie co najmniej tak długim, jak typowe prognozy pogody. Jest to ważne dla osób cierpiących na określone schorzenia (na przykład astmę), ale także dla planowania różnego rodzaju aktywności, które mogą powodować zwiększoną ekspozycję na negatywne oddziaływania zanieczyszczonego powietrza. Dlatego też nowoczesny system oceny stanu i prognozowania stanu jakości powietrza musi składać się z kilku, wzajemnie się uzupełniających składników (ryc. 3).



Ryc. 3. System odtwarzania, monitorowania i prognozowania jakości powietrza

⁹ Patrz pod adresem: <https://earthobservatory.nasa.gov/features/AirQuality/page4.php> (dostęp: 14.05.2021).

Aktualny stan jakości powietrza współcześnie ocenia się poprzez „połączenie” wyników punktowych, precyzyjnych i ciągłych pomiarów naziemnych z pośrednimi, mniej dokładnymi, ale za to obszarowymi pomiarami teledetekcyjnymi (ryc. 3). Te drugie najczęściej wykonywane są nie w sposób ciągły, tylko w pewnych interwałach. Należy również dodać, że znaczący spadek cen elektroniki i innych komponentów spowodował też pojawianie się relatywnie gęstych lokalnych sieci monitoringu powietrza, składających się z prostszych i mniej dokładnych urządzeń pomiarowych¹⁰, ale mimo to wystarczających do zarządzania jakością powietrza, głównie na obszarach dużych aglomeracji miejskich. Taki system tworzy właśnie Warszawa¹¹.

Dodanie do wymienionych wyżej danych aktualnych wyników pomiarów parametrów pogody oraz rezultatów numerycznego jej prognozowania umożliwia zrobienie kolejnego kroku. Wymaga on jednak także najczęściej uzupełniających informacji o lokalizacji i charakterze emisji oraz specyfice terenu. Wykorzystanie szybkich komputerów z oprogramowaniem realizującym obliczenia modeli dyspersji zanieczyszczeń umożliwia wówczas przewidywanie zmian jakości powietrza (ryc. 3)¹².

Ostatnim elementem schematu przedstawionego na rycinie 3 jest odtwarzanie na danym obszarze historii zanieczyszczeń powietrza. W krótkiej skali – dziesięcioleci – najlepszym do tego narzędziem jest bioindykacja. Wykorzystuje ona głównie fakt, że niektóre organizmy pobierają większość substancji biogenicznych i wody z atmosfery, a nie z podłoża. Dzięki temu w biomasie tych organizmów następuje kumulacja niektórych substancji będących składnikami zanieczyszczeń atmosferycznych. Niektóre z takich organizmów na wysoki poziom skażenia reagują obniżeniem tempa przyrostu lub w ogóle wymieraniem. Tak więc możemy wykorzystywać różne wskaźniki biologiczne jakości powietrza: skład gatunkowy zbiorowiska, parametry biometryczne poszczególnych osobników lub zawartość określonych pierwiastków bądź związków chemicznych w biomasie. Do najlepszych bioindykatorów

¹⁰ Gerboles, M., Spinelle, L. and Borowiak, A., (2017). **Measuring air pollution with low-cost sensors**. European Commission, 2017, JRC107461. (<https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC107461>) (dostęp: 14.05.2021).

¹¹ Patrz: <https://www.teraz-srodowisko.pl/aktualnosci/Warszawa-PAS-monitoring-jakosc-powietrza-10236.html>. (dostęp: 14.05.2021)

¹² Colarco, P., da Silva, A., Chin, M., Diehl, T., (2010). **Online simulations of global aerosol distributions in the NASA GEOS-4 model and comparisons to satellite and ground-based aerosol optical depth**, *J. Geophys. Res.*, 115, D14207, doi:10.1029/2009JD012820.

zanieczyszczeń atmosferycznych należą porosty i mchy. Godzik¹³ na przykład, analizując zawartość metali ciężkich w próbkach mchów z terenu Polski pobranych w okresie od 1974 do 2015, stwierdziła znaczący ich spadek – a więc zmniejszenie emisji pyłów przemysłowych. Ilość i rozmieszczenie przestrzenne próbek umożliwiło przedstawienie tego procesu w formie kartograficznej. W dłuższych skalach – setek lat i tysiącleci – najważniejszym źródłem informacji o zmianach składu atmosfery są rdzenie lodowe pobrane z lodowców i łądolodów, a także z osadów organicznych. Badania tego typu wykazały, że regionalne i globalne zmiany jakości powietrza nastąpiły o wiele wcześniej niż początek ery przemysłowej (przełom XVIII i XIX wieku) i eksplozja demograficzna w trakcie ostatnich 120 lat. Ruddiman¹⁴, analizując skład gazów z rdzeni lodowych z Antarktydy, twierdzi, że antropogeniczny wzrost stężenia dwutlenku węgla i metanu w atmosferze, związany z rozwojem rolnictwa, jest widoczny już od 8000 i 5000 lat. W pyłach uwieczonych w rdzeniach lodowych pobranych z Arktyki¹⁵ zapisała się z kolei historia globalnego zanieczyszczenia atmosfery łożem, sięgająca czasów Republiki Rzymskiej.

JAKOŚĆ POWIETRZA REJESTROWANA Z KOSMOSU

Teledetekcja składu powietrza, a w tym także teledetekcja satelitarna, wykorzystuje fakt selektywnej absorpcji promieniowania elektromagnetycznego zachodzącej w trakcie jego drogi w atmosferze Ziemi¹⁶.

¹³ Godzik, B., (2020). **Use of Bioindication Methods in National, Regional and Local Monitoring in Poland—Changes in the Air Pollution Level over Several Decades.** *Atmosphere*, 11(2), 143. doi:10.3390/atmos11020143

¹⁴ Ruddiman, W.F., (2003). **The Anthropogenic Greenhouse Era Began Thousands of Years Ago.** *Climatic Change* 61, 261–293, doi: 10.1023/B:CLIM.0000004577.17928.f

¹⁵ McConnell, J.R., i in. (2020). **Pervasive Arctic lead pollution suggests substantial growth in medieval silver production modulated by plague, climate, and conflict.** *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Jul 2019, 116 (30) 14910-14915; doi: 10.1073/pnas.1904515116.

¹⁶ AbdelSattar, A., (2019). **Monitoring Air Pollution Using Satellite Data.** *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, Riyadh, Saudi Arabia, November 26-28, 2019 (<http://www.ieomsociety.org/gcc2019/papers/126.pdf>) (dostęp: 14.05.2021).

Lahoz, W.A., i in. (2012). **Monitoring air quality from space. The case for the geostationary platform.** *Bulletin of the American Meteorological Society (BAMS)*, February 2012, 221-233, doi:10.1175/BAMS-D-11-00045.1

Aby określać składniki atmosfery, pasywne instrumenty teledetekcyjne z satelitów mierzą widma atmosferyczne wynikające z interakcji między promieniowaniem (słonecznym lub emitowanym przez Ziemię, lub atmosferę), a cząsteczkami poszczególnych substancji. Wykorzystanie tych sygnałów, zawierających specyficzne cechy lub sygnatury różnych cząsteczek, pozwala na określenie ich stężeń na różnych wysokościach (dla silnych absorbentów) lub ich całkowitego stężenia w kolumnie (zintegrowane wzdłuż pionu), dla słabych absorbentów. Każda linia absorpcji/emisji molekularnej (w paśmie podczerwieni - IR) lub przekrój (w paśmie ultrafioletu - UV) w widmie ma charakterystyczną sygnaturę: pozycja wskazuje „tożsamość” cząsteczki, a intensywność określa jej stężenie atmosferyczne. Aby prawidłowo określić stężenia atmosferyczne, z dowolnego, nieprzetworzonego widma rejestrowanego przez czujnik zainstalowany na satelicie, wymagane są dodatkowe parametry, takie jak charakterystyka przyrządu (typ detektora, właściwości jego optyki itp.), a także wzorce spektroskopowe i dane pomocnicze, takie jak temperatura lub współczynniki masy powietrza oraz algorytm transferu promieniowania atmosferycznego. Wykorzystywane do tego celu instrumenty to głównie spektrometry o wysokiej rozdzielczości widmowej i zakresie rozciągającym się od termicznej podczerwieni (IR) do widmowego ultrafioletu (UV).

W latach 80. XX wieku, wykonywane z kosmosu w skali globalnej, obserwacje gazów śladowych dotyczyły głównie pary wodnej i ozonu. Na przykład spektrometr do mapowania całkowitego ozonu (TOMS¹⁷) był w stanie mierzyć powstawanie dziury ozonowej nad Antarktydą i monitorować jej ewolucję. Jego uruchomienie było silnie powiązane z wdrożeniem w roku 1987 Protokołu Montrealskiego w sprawie zakazu stosowania substancji zubożających warstwę ozonową.

Instrumentalne techniki teledetekcji przeznaczone do monitorowania stężenia gazów atmosferycznych uległy w ciągu ostatnich kilku dziesięcioleci znacznej poprawie. Dzięki udoskonaleniu technik pomiarowych i algorytmom identyfikacji poszczególnych substancji możliwe jest obecnie dostarczanie informacji ilościowych o stężeniach wielu gazów śladowych i zanieczyszczeń w skali regionalnej, a nawet lokalnej,

Martin, R.V., (2008). **Satellite remote sensing of surface air quality**. *Atmospheric Environment* 42, 7823-7843, doi:10.1016/j.atmosenv.2008.07.018. Streets, D.G., (2013). **Emissions estimation from satellite retrievals: A review of current capability**, *Atmospheric Environment*, 77, 1011-1042, doi: 10.1016/j.atmosenv.2013.05.051.

Viatte, C. i in. (2020). **Air Pollution and Sea Pollution Seen from Space**. *Surv Geophys* 41, 1583-1609 (2020), doi: 10.1007/s10712-020-09599-0.

¹⁷ Patrz pod adresem: https://en.wikipedia.org/wiki/Total_Ozone_Mapping_Spectrometer. (dostęp: 14.05.2021).

z coraz większą rozdzielczością pionową. Najnowsze osiągnięcia pozwalają nawet, w przypadku niektórych silnie reaktywnych substancji, na sondowanie do samej powierzchni Ziemi. Obecnie istnieje już wiele instrumentów satelitarnych, które mogą mierzyć zanieczyszczenie atmosfery. Najnowocześniejszymi z nich, wykorzystującymi promieniowanie widzialne UV i termiczne promieniowanie podczerwone, są odpowiednio TROPOMI (TROPOspheric Monitoring Instrument¹⁸) oraz IASI (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer¹⁹). Ich działanie potwierdziło, że można już względnie dokładnie monitorować stężenia i zmienność kluczowych gazów tworzących zanieczyszczenie atmosfery.

TROPOMI jest spektrometrem multispektralnym, który działa w pasmach promieniowania ultrafioletowego i widzialnego (UV-Vis - 270–500 nm), bliskiej podczerwieni (675–775 nm) i podczerwieni (2305–2385 nm). Został on umieszczony w przestrzeni kosmicznej przez Europejską Agencję Kosmiczną (ESA) w październiku 2017 roku. Celem jego działania jest monitorowanie przy poziomie gruntu, takich składników zanieczyszczeń, jak: dwutlenek azotu, ozon, formaldehyd (HCHO) i dwutlenek siarki, z nigdy wcześniej nieosiągalną rozdzielczością przestrzenną ($3,5 \times 7$ km)²⁰.

Instrument IASI wykonuje zaś pomiary w 8641 kanałach podczerwonej części widma (podczerwień termalna) i umożliwi detekcję aż 31 typów cząsteczek. Trzy identyczne instrumenty IASI zostały zbudowane we współpracy Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) i Europejskiej Organizacji Eksploatacji Satelitów Meteorologicznych (EUMETSAT) i zainstalowane na pokładach trzech satelitów: Metop-A wystrzelonego 19 października 2006 roku, Metop-B - 17 września 2012 roku i Metop-C - w dniu 7 listopada 2018 roku. Wyniki z pomiarów TROPOMI i IASI są analizowane i udostępniane w czasie zbliżonym do rzeczywistego, tak aby dostarczyć mapy stężeń określanych substancji dla całej Ziemi najpóźniej 3 godziny po ich rejestracji.

Komplementarność pomiarów dokonywanych z pokładów satelitów i tych *in situ* na powierzchni Ziemi pozwala na lepsze określanie składu

¹⁸ Veefkind, J.P. i in. (2012). **TROPOMI on the ESA Sentinel-5 Precursor: a GMES mission for global observations of the atmospheric composition for climate air quality and ozone layer applications.** *Remote Sensing of Environment*, 120: 70–83, doi: 10.1016/j.rse.2011.09.027.

¹⁹ Clerbaux, C. i in. (2009). **Monitoring of atmospheric composition using the thermal infrared IASI/MetOp sounder.** *Atmos Chem Phys* 9: 6041–6054, doi: 10.5194/acp-9-6041-2009.

²⁰ Patrz pod adresem: http://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-5P. (dostęp: 1.05.2021).

chemicznego atmosfery. Pomiar *in situ* są dokładniejsze w skali lokalnej, podczas gdy pomiary satelitarne zapewniają lepsze pokrycie przestrzenne wraz z informacjami o transporcie smug zanieczyszczeń. Ponadto przyrządy satelitarne mogą monitorować obszary bardzo odległe od naziemnych sieci pomiarowych. Obserwacje satelitarne są zatem ważne i służą do ograniczania emisji, potwierdzania naszej wiedzy na temat procesów fizycznych i chemicznych zachodzących w atmosferze oraz ulepszania, po asymilacji w dedykowanych modelach atmosferycznych, przewidywania szczytów zanieczyszczeń. Rutynowe prognozy zanieczyszczenia dla celów operacyjnych są dostarczane przez Copernicus Atmospheric Composition Monitoring²¹, gdzie dane z kilkunastu instrumentów znajdujących się na pokładzie satelitów są asymilowane w modelach regionalnych i globalnych, dostarczając informacji o jakości powietrza w zakresie głównych składników zanieczyszczeń.

Oprócz profesjonalnych zastosowań danych pochodzących z tele-detekcji satelitarnej jakości powietrza, ESA udostępnia je również nieprofesjonalistom (edukacja, media itp.). Główną platformą przeznaczoną do tego celu jest witryna EO-Browser²² (ryc. 4 i 5).

JAKOŚĆ POWIETRZA NA OBSZARZE WIELKOPOLSKI I POZNANIA NA PODSTAWIE DANYCH Z CZUJNIKA TROPOMI

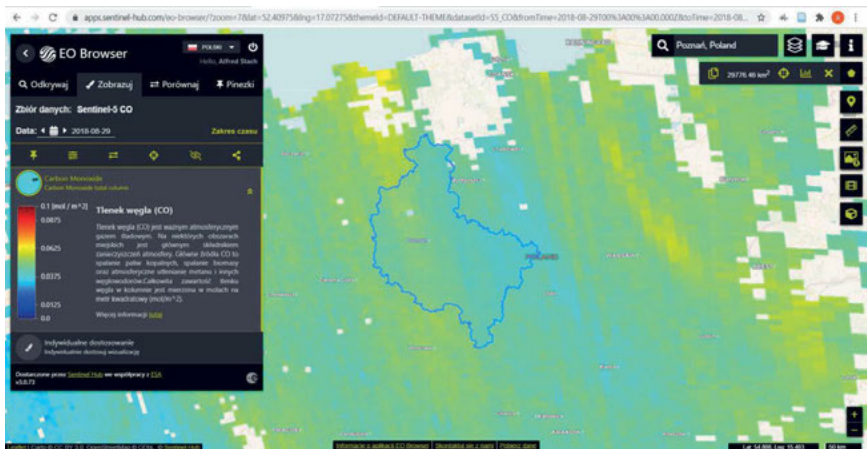
Aby zademonstrować potencjał zawarty w danych rejestrowanych przez czujnik TROPOMI, zainstalowany na pokładzie satelity Sentinel-5P, z witryny EO-Browser²³ pobrałem próbkę jego pomiarów obejmujących województwo wielkopolskie wraz z otoczeniem w okresie od 30 kwietnia roku 2018 do 31 grudnia roku 2020 roku. Materiały te posłużyły do wykonania kilku wizualizacji i prostych analiz, których wyniki zaprezentowano poniżej.

Po pierwsze, wybrano dwa dni z najmniejszą pokrywą chmur i wykonano mapy występującego w trakcie przelotu satelity Sentinel-5P rozkładu stężeń dwutlenku azotu (ryc. 6). Ponieważ rozdzielczość przestrzenna czujnika wynosi $7,5 \times 3,5$ km (powierzchnia piksela obrazu

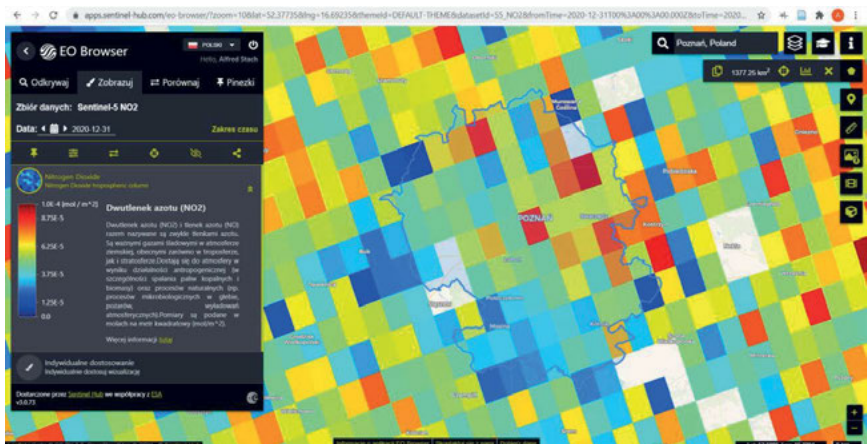
²¹ Patrz pod adresem: <https://atmosphere.copernicus.eu/> (dostęp: 14.05.2021).

²² Patrz pod adresem: <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser>. (dostęp: 14.05.2021).

²³ <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser>. (sprawdzone 14.05.2021)

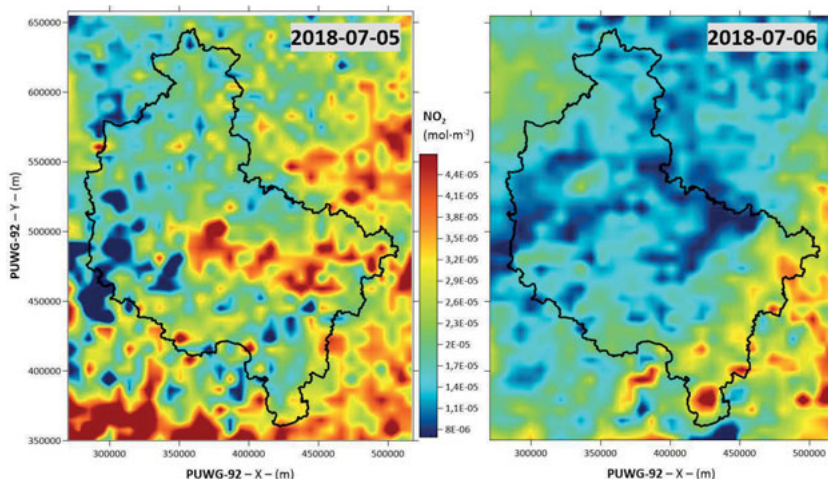


Ryc. 4. Zmienność przestrzenna stężenia tlenu węgla (w $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}$) w kolumnie atmosfery nad Polską w dniu 29 sierpnia 2018 roku zmierzona czujnikiem TROPOMI z pokładu satelity Sentinel-5P – wizualizacja wykonana za pomocą aplikacji sieciowej EO Browser (<https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/>). Obszary bez danych (brak wypełnienia kolorem) były zakryte chmurami. Dla lepszej orientacji przestrzennej dodano poligon z konturem województwa wielkopolskiego.



Ryc. 5. Zmienność przestrzenna stężenia dwutlenku azotu (w $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}$) w kolumnie atmosfery nad centralną Wielkopolską w dniu 31 grudnia 2020 roku zmierzona czujnikiem TROPOMI z pokładu satelity Sentinel-5P – wizualizacja wykonana za pomocą aplikacji sieciowej EO Browser (<https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/>). Obszary bez danych (brak wypełnienia kolorem) były zakryte chmurami. Dla lepszej orientacji przestrzennej dodano poligon z konturem aglomeracji poznańskiej wyznaczonym przez miasto Poznań i sąsiadujące z nim gminy (1377,25 km^2).

= 24,5 km²), to w granicach województwa mającego powierzchnię 29 827 km² mógł on wykonać maksymalnie ponad 1217 jednostkowych pomiarów. W tym samym czasie na tym terenie istniało 10 punktów, w których Wojewódzki Inspektorat Ochrony Środowiska prowadził monitoring jakości powietrza²⁴. Na rycinie 6 drobne, bo nieprzekraczające 2%, a wynikające z zachmurzenia, braki danych uzupełniono za pomocą interpolacji.



Ryc. 6. Zmienność przestrzenna stężenia dwutlenku azotu (w mol·m⁻²; w legendzie użyto zapisu wykładniczego, to jest wartość określona jako 2E-05 oznacza 0,00002 mol·m⁻²) w kolumnie atmosfery nad województwem wielkopolskim w przykładowych dwóch dniach o bardzo niskim zachmurzeniu (braki danych uzupełniono przez interpolację) zmierzona przez czujnik TROPOMI z pokładu satelity Sentinel-5P.

Najciekawszym elementem na mapie z 5 lipca 2018 roku (ryc. 6) jest widoczna na dystansie ponad 100 km smuga powietrza o wysokim stężeniu NO₂, mająca swój początek nad Poznaniem. Utrzymująca się prawdopodobnie przez okres słabych wiatrów nad miastem czapa silnie zanieczyszczonego powietrza została przewiana w kierunku wschodnim. Napływ „nowego”, mniej zanieczyszczonego powietrza był tak intensywny, że już następnego dnia cała środkowa i północna Wielkopolska znajdowała się w zasięgu niskich stężeń NO₂ (ryc. 6).

²⁴ Patrz pod adresem: <https://poznan.wios.gov.pl/> (sprawdzone 14.05.2021).

Pozyskane dane przedstawiono także w postaci serii czasowych (ryc. 7), wykonanych dla całego województwa i osobno dla obszaru miasta Poznania. Oczywiście dane te nie są kompletne ze względu na zachmurzenie. Brak jest niektórych terminów, bo zachmurzenie było wtedy całkowite, a każdego innego dnia średnia jest obliczana z różnych co do wielkości i rozmieszczenia przestrzennego próbek. Z oczywistych względów braków takich jest więcej w serii danych obejmujących miasto Poznań. Mimo to zaprezentowane na ryc. 7 wykresy pokazują klarowne prawidłowości przebiegu sezonowego i relacji pomiędzy porównywanymi obszarami.

Powietrze nad Poznaniem jest, jak się można było spodziewać, bardziej zanieczyszczone niż nad całym województwem (ryc. 7). Zdarzają się jednak, szczególnie w przypadku NO₂, krótkotrwałe epizody wysokich stężeń, w czasie których średnia „województwa” jest wyższa od średniej miejskiej. Warto odnotować jest zróżnicowanie przebiegu i amplitudy cykli sezonowych NO₂, CO i O₃. Dane CH₄ są najmniej kompletne, ale dość jednoznacznie wskazują na istnienie długookresowego trendu rosnącego, co dobrze koresponduje z tendencją obserwowaną w skali globalnej²⁵.

Najciekawsze są jednakże wyniki pokazujące wpływ na jakość powietrza nad Poznaniem i Wielkopolską ograniczeń społecznych i gospodarczych wprowadzonych w trakcie pierwszej fali epidemii COVID-19. W wielu publikacjach z różnych części świata wskazywano na silny spadek zanieczyszczenia powietrza jako skutek uboczny spadku aktywności społecznej i gospodarczej w trakcie pandemii wywołanej przez koronawirusa SARS-COV-2²⁶. Większość z tych opracowań opierała się na danych jakości powietrza pochodzących z teledetekcji satelitarnej²⁷. Brak jest jednakże takich analiz dla naszego regionu.

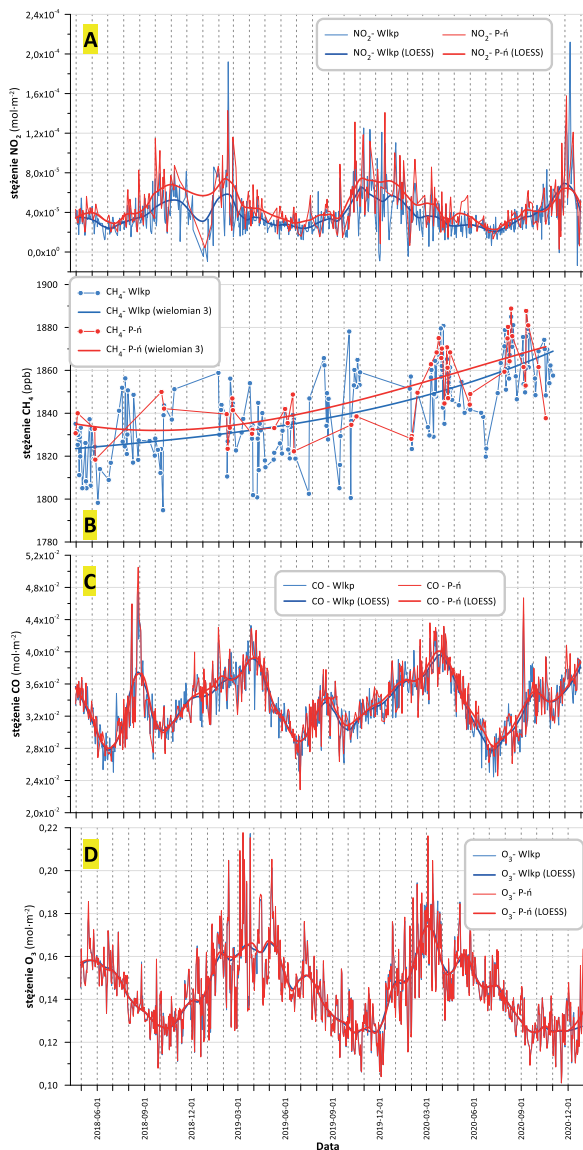
²⁵ Patrz: https://en.wikipedia.org/wiki/Atmospheric_methane. (dostęp: 14.05.2021).

²⁶ Patrz: <https://atmosphere.copernicus.eu/european-air-quality-information-support-covid-19-crisis/>. (dostęp: 14.05.2021).

²⁷ Dutta, V., Kumar, S., Dubey, D., (2021). **Recent advances in satellite mapping of global air quality: evidences during COVID-19 pandemic**. *Environmental Sustainability*, doi: 10.1007/s42398-021-00166-w

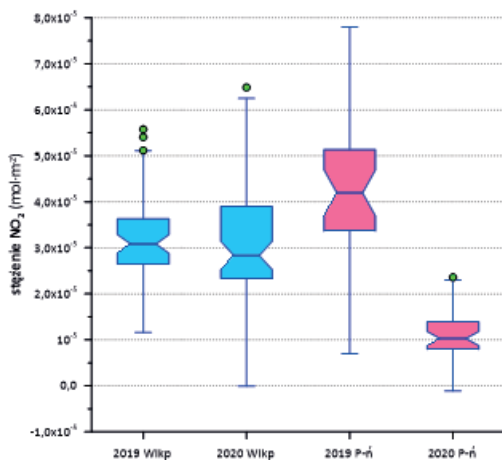
Liu, A. i in. (2020). **Abrupt decline in tropospheric nitrogen dioxide over China after the outbreak of COVID-19**. *Sci. Adv.* 6, eabc2992.

Le, T., i in. (2020). **Unexpected air pollution with marked emission reductions during the COVID-19 outbreak in China**. *Science*, 369 (6504), 702-706, doi:10.1126/science.abb7431 https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-5P/Air_pollution_remains_low_as_Europeans_stay_at_home. (dostęp: 14.05.2021).



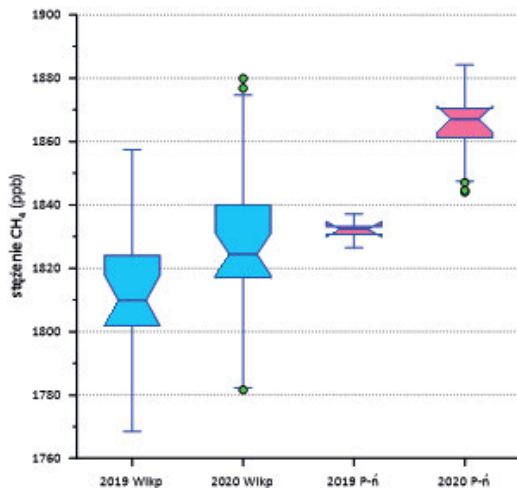
Ryc. 7. Przebiegi czasowe czterech wskaźników zanieczyszczenia powietrza (A – dwutlenek azotu, B – metan, C – tlenek węgla i D – ozon przy powierzchni) mierzonych w okresie od 30 kwietnia roku 2018 do 31 grudnia roku 2020 roku w kolumnie atmosfery nad województwem wielkopolskim i Poznaniem za pomocą czujnika TROPOMI z pokładu satelity Sentinel-5P. Wartości terminowe zostały wygładzone za pomocą lokalnych LOESS, wykresy A, C i D) lub globalnych wielomianów (wykres B).

Z całego dostępnego zbioru danych pochodzących z czujnika TROPOMI wyselekcjonowano okres pomiędzy 15 marca a 31 maja roku 2019 roku i porównano z analogicznym okresem roku następnego, to jest 2020. W niniejszym opracowaniu zademonstrowano wyniki uzyskane dla stężeń NO_2 i CH_4 (ryc. 8 i 9). Wnioski wynikające z wizualizacji zweryfikowano przy użyciu formalnych testów statystycznych. Najbardziej znaczące i wiarygodne są wyniki uzyskane dla stężeń dwutlenku azotu (ryc. 8). Średnie stężenie NO_2 nad Poznaniem zmalało w trakcie pierwszej fali pandemii dwukrotnie (z poziomu $0,00004$ do $0,00001 \text{ mol m}^{-2}$). Zmniejszył się także znacząco rozrzut wartości. Prawdopodobieństwo, że wyniki te są przypadkowe, jest znikome – odpowiednio $p = 3,21 \cdot 10^{-16}$ i $p = 5,11 \cdot 10^{-9}$. Powietrze, które jeśli chodzi o stężenia NO_2 , jest zazwyczaj nad Poznaniem bardziej zanieczyszczone niż w całym województwie, w trakcie „lockdown” stało się czystsze. Średnia zawartość dwutlenku azotu w powietrzu nad całym województwem w porównywanych okresach roku 2019 i 2020 nie uległa znaczącej zmianie, wzrosła za to zmienność stężeń. Również i ta różnica jest istotna statystycznie ($p = 0,0361$). Zupełnie inaczej wygląda porównanie



Ryc. 8. Rozkłady stężeń dwutlenku azotu (NO_2 w mol m^{-2}) zarejestrowane nad Wielkopolską (niebieskie pudełka) i Poznaniem (różowe pudełka) za pomocą czujnika TROPOMI z pokładu satelity Sentinel-5P pomiędzy 15 marca i 31 maja w latach 2019 i 2020.

Pudełka (ang. *box*) reprezentują przedział międzykwartyłowy z medianą. Wcięcia określają 95% przedział ufności dla mediany. Wąsy (ang. *whiskers*) sięgają zakresu $1,5 \cdot$ szerokości przedziału międzykwartyłowego. Zielonymi punktami zaznaczono dane odstające. Ze względu na całkowite zachmurzenie dla Wielkopolski były dostępne dane z 76,6 i 81,1% dni w analizowanym okresie odpowiednio w roku 2019 i 2020. Analogiczne wskaźniki dla Poznania wynosiły 59,7 i 49,3%.



Ryc. 9. Rozkłady stężeń metanu (CH_4 w ppb – częściach na miliard) zarejestrowane nad Wielkopolską (niebieskie pudełka) i Poznaniem (różowe pudełka) za pomocą czujnika TROPOMI z pokładu satelity Sentinel-5P pomiędzy 15 marca i 31 maja w latach 2019 i 2020.

Pudełka (ang. *box*) reprezentują przedział międzykwartyłowy z medianą. Wcięcia określają 95% przedział ufności dla mediany. Wąsy (ang. *whiskers*) sięgają zakresu $1,5 \cdot$ szerokości przedziału międzykwartyłowego. Zielonymi punktami zaznaczono dane odstające. Ze względu na zamurzenie dla Wielkopolski były dostępne dane z 24,7 i 39,0% dni w analizowanym okresie odpowiednio w roku 2019 i 2020. Analogiczne wskaźniki dla Poznania wynosiły 3,9 i 15,6%.

rozkładów metanu (ryc. 9). Te wyniki, ze względu jednak na bardzo małe próby, mają niższą wiarygodność. Stężenia CH_4 w roku 2020 były i nad Poznaniem, i nad całą Wielkopolską wyższe niż w roku 2019. Istotność tych różnic jest odpowiednio na poziomie $p = 0,01$ i $p = 0,001$.

PODSUMOWANIE

Zanieczyszczenie powietrza to jeden z najważniejszych problemów społecznych i środowiskowych, z którymi mierzy się ludzkość. Dziewięćdziesiąt jeden procent populacji Ziemi oddycha powietrzem niespełniającym kryteriów WHO, a straty ekonomiczne sięgają 6,6% światowego produktu brutto. Miasto Poznań traci co roku z tego tytułu ponad 4 mld złotych. Jakkolwiek zanieczyszczenie powietrza stało się pierwszoplanowym problemem ludzkości w XX wieku, to globalne

zmiany składu atmosfery w wyniku działalności ludzkiej zaczęły się kilka tysięcy lat temu, a naturalny poziom stężeń pyłów toksycznego ołowiu został przekroczony kilka razy już ponad dwa tysiące lat temu. Bardzo istotne, ale często niedoceniane, są inne – poza zdrowiem publicznym – skutki zanieczyszczenia powietrza: obniżka plonów roślin uprawnych, gorsza kondycja zwierząt hodowlanych oraz zaburzenia funkcjonowania ekosystemów. Antropogeniczny efekt cieplarniany, uważany za największe zagrożenie ludzkości w XXI wieku, jest też skutkiem zanieczyszczenia atmosfery przez działalność gospodarczą (dwutlenek węgla, metan, tlenki azotu, ozon przy powierzchni, aerozole przemysłowe, rolnicze i inne).

Nowe dane wskazują na silny związek między zanieczyszczeniem powietrza a chorobami neurodegeneracyjnymi i poziomem przestępczości. Śmiertelność na COVID-19 w skali globalnej w ok. 15% powiązana jest z jakością powietrza – w Polsce ten odsetek sięga 28% (drugie, niechlubne miejsce na świecie).

Bezpośrednie, precyzyjne pomiary składników zanieczyszczeń powietrza są bardzo kosztowne i wymagają wysokokwalifikowanego personelu. Z tego względu sieć pomiarowa, nawet w „bogaty” krajach, jest niewystarczająca do pełnej, czasoprzestrzennej, oceny skażeń. Dane pochodzące z narodowych sieci monitoringowych są uzupełnione przez pomiary z wykorzystaniem tanich „niecertyfikowanych” urządzeń, bioindykację skażeń, a także teledetekcję zanieczyszczeń powietrza z poziomu orbity okołoziemskiej. Wszystkie te dane są wykorzystywane w modelach matematycznych dynamiki atmosfery, umożliwiającym prognozowanie dyspersji zanieczyszczeń i ich stężeń.

Teledetekcja satelitarna zanieczyszczeń atmosfery prowadzona w celowy, skoordynowany sposób sięga ponad 30 lat. Wykorzystuje ona fakt selektywnego pochłaniania i rozpraszania różnych długości fal promieniowania elektromagnetycznego przez różne gazowe i pyłowe składniki atmosfery. Zaletami teledetekcji satelitarnej jest możliwość uzyskania w ciągu od kilku godzin do jednej doby obrazu dla całej kuli ziemskiej, zachowującego jednakowy poziom dokładności oraz kontynuację takich pomiarów przez wiele lat. Najdłużej nieprzerwanie działające czujniki satelitarne (MODIS, MOPITT) funkcjonują od 21 lat (satelita Terra). Pomiary teledetekcyjne mają charakter pośredni, a to wpływa na ich znacznie niższą niż pomiarów naziemnych dokładność. Nierzadko możliwość i dokładność pomiarów ogranicza zachmurzenie. Dane satelitarne dotyczące jakości powietrza są podawane jako „ilości w kolumnie”, tj. jedna wartość dla najniższych 15 km atmosfery. Instrumenty

satelitarne są często najmniej czułe blisko powierzchni, czyli tam, gdzie jakość powietrza nas najbardziej interesuje.

Postęp techniczny stopniowo jednak zwiększa możliwości satelitarnego monitoringu jakości powietrza. Na lata 2020–2022 planowane jest wystrzelenie przez ESA (Sentinel-4 i Sentinel-5²⁸), NASA (TEMPO²⁹) i Koreę Południową satelitów (GEMS³⁰), które będą mierzyć znacznie więcej niż dotychczas, a także częściej i z większą rozdzielczością przestrzenną. Większość z wymienionych wyżej czujników będzie zainstalowana na satelitach geostacjonarnych, czyli krążących wokół Ziemi w tym samym tempie i kierunku z jakim kręci się nasza planeta. Ze względu na to przyrządy te „wiszą” ciągle nad tym samym obszarem. Traci się w związku z tym możliwość rejestracji stanu atmosfery dla całej powierzchni Ziemi, ale zyskuje się możliwość praktycznie ciągłego monitoringu.

Ważnym, a być może przełomowym, elementem systemu kontroli, prognozowania i zapobiegania niebezpiecznym zanieczyszczeniom powietrza będzie partycypacja społeczna. Jej elementem może być upowszechnienie tanich, indywidualnych monitorów jakości wdychanego powietrza, sterowanych za pomocą smartfonu i wysyłających w czasie rzeczywistym dane o wynikach pomiarów i ich lokalizacji³¹.

²⁸ Patrz pod adresami: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-4> i <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-5/overview> (dostęp: 21.05.2021).

²⁹ Patrz pod adresami: <https://www.nasa.gov/press-release/langley/nasa-s-tempo-air-pollution-space-sensor-completed> i <https://www.nasa.gov/feature/langley/satellite-host-named-for-nasa-air-pollution-sensor> (dostęp: 21.05.2021).

³⁰ Patrz pod adresem: <http://gems1.yonsei.ac.kr/> (dostęp: 21.05.2021).

³¹ Patrz między innymi pod adresem: <https://plumelabs.com/en/flow/> (dostęp: 21.05.2021).